

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
з курсу «Енергетичні системи та комплекси 3.
Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії»,
для студентів спеціальності
«Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Київ 2017

Дослідження роботи фотоелектричного модуля [Текст]: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів спеціальності «Теплоенергетика» / Уклад В.В. Дубровська, В.І. Шкляр, В.В. Задвернюк – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 32 с.

Рекомендовано вченою радою Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”
(Протокол № 8 від 27 березня 2017)

На в ч а л ь н е в и д а н н я

Дослідження роботи фотоелектричного модуля

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
для студентів спеціальності «Теплоенергетика»

Укладачі: *Дубровська Вікторія Василівна, к.т.н, доцент,*
Шкляр Віктор Іванович, к.т.н, доцент,
Задвернюк Володимир Володимирович, старший викладач

Відповідальний редактор: *Єщенко О.І., к.т.н., доцент*

Рецензент: *Ковальчук А.М., к.т.н., доцент*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Мета і основні завдання роботи.....	5
2 Основні теоретичні відомості.....	6
3 Опис експериментальної установки.....	19
4 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи...	21
5 Порядок і рекомендації щодо виконання лабораторної роботи.....	22
5.1 Визначення інтенсивності надходження світлової енергії від штучного джерела світла.....	23
5.2 Вплив зміни рівня освітленості на характеристики сонячного модуля.....	24
5.3 Вплив кута нахилу сонячного модуля відносно джерела світла на його характеристики.....	28
5.4 Вплив забруднення робочої поверхні сонячного модуля на його характеристики.....	29
5.5 Вплив температури робочої поверхні сонячного модуля на його характеристики.....	30
Контрольні запитання.....	31
Література.....	32

ВСТУП

Ресурси викопних видів палива витрачаються високими темпами. В цьому столітті їх дефіцит може істотно позначитися на житті людей, в зв'язку з чим в якості альтернативи особлива увага вже зараз приділяється відновлюваним джерелам енергії (ВДЕ) [1]. Основними перевагами ВДЕ є невичерпність та екологічна чистота експлуатації більшості установок на їх основі.

Сонячна енергетика є однією з найперспективніших галузей відновлюваної енергетики. Вона має колосальний енергетичний потенціал, який перевищує енергію всіх світових запасів нафти, газу, вугілля та інших енергетичних ресурсів.

В даний час різко зріс інтерес, як до теоретичних, так і до прикладних розробок в області перетворення сонячного випромінювання (СВ) в електричний струм, що реалізуються в фотоелектричних модулях (ФЕМ).

Світове виробництво сонячних елементів перевищує 50 МВт в рік і збільшується щорічно на 30%. Сучасний рівень виробництва сонячних елементів відповідає початковій фазі їх використання для освітлення, підйому води, телекомунікаційних станцій, харчування, побутових приладів в окремих районах і в транспортних засобах.

Експериментальне дослідження роботи фотоелектричного модуля дозволяє визначити вплив різних факторів на ефективність його роботи.

1 МЕТА І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи - закріпити знання отримані в процесі вивчення курсу, вивчити принцип дії полікристалічного сонячного модуля, ознайомитися з методикою проведення вимірювань, засвоїти методику зняття вольт-амперної характеристики сонячного модуля, одержати експериментальні характеристики ФЕМ.

Завдання

1. Експериментально дослідити вплив на ефективність роботи сонячного модуля:

- рівня та характеру освітлення ФЕМ;
- температури поверхні фотоелементів;
- кута нахилу поверхні ФЕМ;
- ступеня чистоти поверхні;
- застосування системи охолодження;
- величини навантаження.

2. Визначити ККД сонячного модуля при різних режимах та умовах роботи.

3. Проаналізувати одержані результати та зробити висновки по лабораторній роботі.

Виконання лабораторної роботи починають після детального ознайомлення з методичними вказівками.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сонячна енергетика з урахуванням потенціалу свого розвитку є джерелом енергії майбутнього, тому обсяги розвитку її ринку будуть тільки рости.

Максимальна потужність сонячного випромінювання складає 1000 Ватт [2] на один квадратний метр земної поверхні (табл.1).

Таблиця 1
Потужність сонячного випромінювання [3]

Погода			
Ясне синє небо	Мінлива хмарність	Сонце у вигляді білого диску	Похмурий зимовий день
1000 Вт/м ²	600 Вт/м ²	300 Вт/м ²	100 Вт/м ²

Найбільш близьким до широкого впровадження є спосіб, що використовує трансформування енергії сонячного випромінювання в електричну енергію в сонячних батареях, які використовують в якості децентралізованого (автономного) електропостачання.

За кордоном встановлення таких систем заохочується владою шляхом часткової оплати початкових витрат та надання податкових пільг, що дозволяє зменшити термін окупності таких заходів до кількох років. За прогнозами спеціалістів через 5-10 років виробництво електроенергії сонячними батареями стане не тільки конкурентоспроможним, а й більш дешевим ніж, традиційні види енергії.

Основним компонентом сонячної батареї є фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) - фотоелементи або сонячні елементи - напівпровідникові пристрої (рис. 1 – 2) [4], в яких відбувається просторове розділення позитивних і негативних носіїв заряду при поглинанні напівпровідником сонячного електромагнітного випромінювання у видимій і інфрачервоній частині світла.

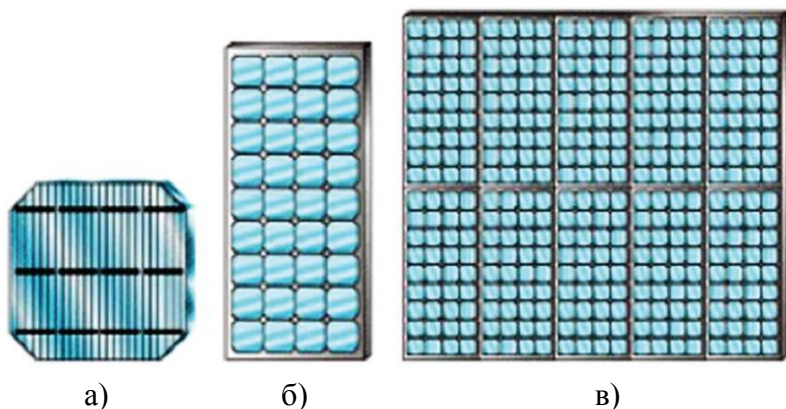


Рис. 1 Сонячний елемент (ФЕП) – а; сонячна панель (фотоелектричний модуль) – б; сонячна батарея - в.

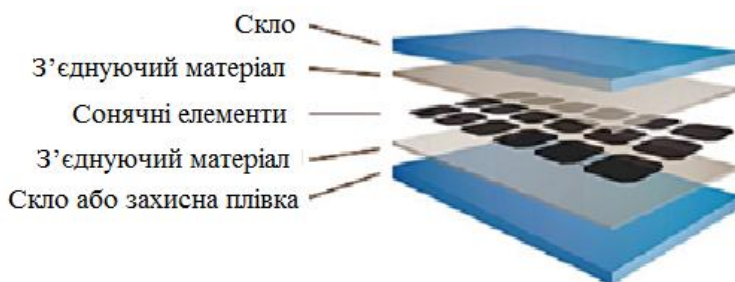


Рис. 2 Структура сонячної панелі.

Принцип роботи ФЕП можна пояснити на прикладі перетворювачів з р-п-переходом, які широко застосовуються в сучасній

сонячній та космічній енергетиці. Електронно-дірковий перехід створюється шляхом легування пластинки монокристалічного напівпровідникового матеріалу з певним типом провідності (тобто **p** - або **n** - типу) домішкою, яка забезпечує створення поверхневого шару з провідністю протилежного типу.

Електричні властивості напівпровідників описуються зонною теорією. Фотоелектричні перетворювачі працюють за принципом внутрішнього фотоефекту, при якому фотони (енергія електромагнітного випромінювання), що поглинаються в базовому шарі ФЕП, передають свою енергію безпосередньо електронам (рис. 3).

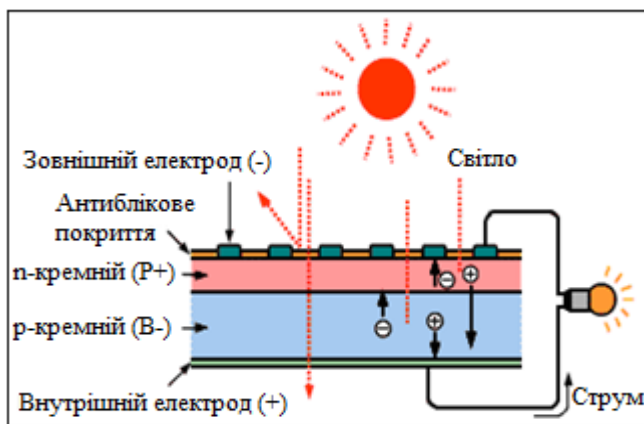


Рис. 3 Виникнення фотоелектричного струму в сонячному елементі.

Енергія, яку має електрон у зв'язаному з атомом стані, лежить в межах заповненої (валентної) зони (рис. 4). Енергія вільного електрона відносно велика і лежить в більш високій енергетичній зоні – зоні провідності. Між ними знаходиться заборонена зона,

яка являє собою внутрішнє електричне поле, яке перешкоджає подальшому переходу електронів і дірок через границю.

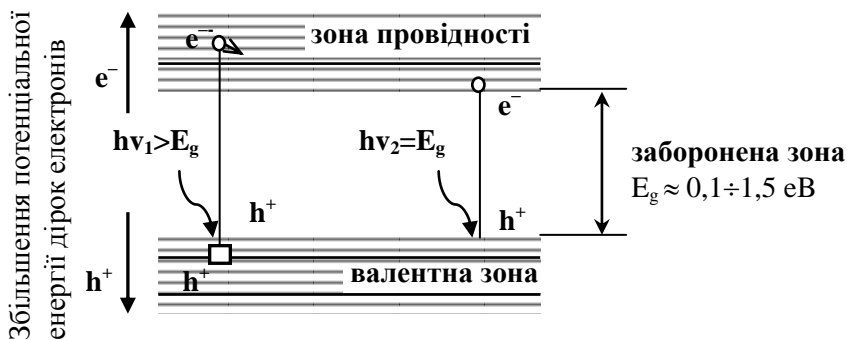


Рис. 4 Зонна структура напівпровідника:

$h\nu_1 < E_g$ – фотопоглинання фотонів відсутнє;

$h\nu_1 > E_g$ – надлишок енергії, що виділяється у вигляді теплоти;

$h\nu_1 = E_g$ – енергія фотона, яка дорівнює ширині забороненої зони.

Ширина забороненої зони для більшості напівпровідників лежить в межах 0,1 - 1,5 eV, а товщина – 10^{-4} – 10^{-6} см. При великих значеннях забороненої зони, більше 2,0 eV, маємо справу з діелектриками.

Якщо енергія фотона дорівнює або перевищує ширину забороненої зони, то відбувається відрив одного з електронів від свого атома і перехід його з валентної зони в зону провідності.

Фотогенеровані в **p** - області електрони витягуються електричним полем в **n** - область, і, навпаки, фотогенеровані в **n** - області дірки витягуються електричним полем в **p** - область. В результаті дифузії по обидва боки від границі утворюються об'ємний позитивний заряд в області **n** і об'ємний негативний заряд в **p** - області. Таким чином виникає електричне поле.

Якщо в ланцюг ФЕП включити зовнішнє електричне навантаження, яке має електричний опір R_H , то в ньому потече електричний струм - потік електронів від n - області до p - області, де вони рекомбінують з дірками.

За допомогою контактної системи досягається збір і відведення електронів в зовнішньому колі. На внутрішній стороні контакти можуть бути суцільними, а на зовнішній - у вигляді гребінки або сітки.

Існують різні типи ФЕП (рис. 5). Найбільшого поширення в фотоелектричних установках наземного застосування отримали кремнієві ФЕП трьох видів - на основі монокристалічного, полікристалічного і аморфного кремнію. Велика частина всіх модулів виробляється з використанням полі і монокристалічного кремнію.



монокристалічні
кремнієві
елементи



полікристалічні
кремнієві
елементи



елементи з
аморфного
кремнію

Рис. 5 Основні типи ФЕП.

ККД ФЕП становить:

- з монокристалічного кремнію близько 14-19%, а у передових модулів - 21,5% [3];
- з полікристалічного кремнію – 14-17%;
- з аморфного кремнію – близько 5-8%.

За рахунок більш високого ККД монокристалічних кремнієвих пластин знижується площа сонячних панелей, що має значення при обмеженому просторі для розміщення сонячної установки, але істотно збільшуються витрати на їх виробництво.

Елементи з аморфного кремнію менш схильні до дії високих температур, тому їх енергоефективність в дуже спекотні дні не знижується на відміну від полі- та монокристалів. Вони мають кращу здатність перетворювати сонячне випромінювання в електроенергію в умовах недостатньої освітленості або значної хмарності навіть порівняно з полікристалічними перетворювачами.

Недоліками таких ФЕП є низький ККД (близько 6%) та невеликий термін служби через швидку деградацію елемента.

Сонячні елементи складають основу ФЕМ. У такому модулі вони з'єднані в залежності від необхідних характеристик послідовно і / або паралельно в електричному колі на одній підкладці.

Переваги ФЕМ обумовлені відсутністю рухомих частин, їх високою надійністю і стабільністю; використанням як прямого, так і розсіяного випромінювання, не вимагає стеження за Сонцем і практично не потребує обслуговування. Модульний тип конструкції дозволяє створювати установки з різними значення-

ми напруги і практично будь-якої потужності.

Графічне зображення залежності напруги від сили струму (густини струму) називається вольт-амперною характеристикою – ВАХ. На рис. 6 наведено ВАХ ФЕП з наступними параметрами:

- $I_{кз}$ – струм короткого замикання – максимальний струм, який протікає через сонячний елемент при нульовій напрузі, А;
- $U_{хх}$ – напруга холостого ходу – максимальна напруга, яка створюється сонячним елементом, що виникає при нульовому струмі, В;
- P_{MAX} – точка оптимальної потужності – максимальна вихідна потужність при оптимальних умовах експлуатації (I_{mp} і U_{mp}), Вт;
- I_{mp} – струм в точці максимальної потужності, А;
- U_{mp} – напруга в точці максимальної потужності, В.

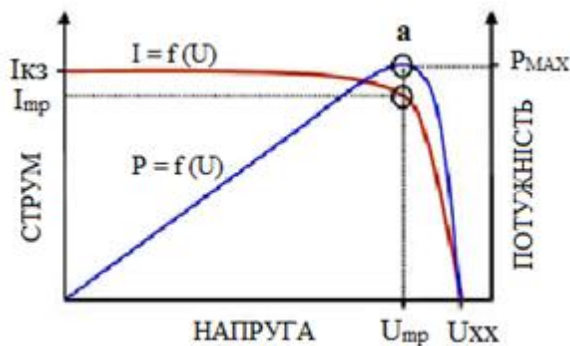


Рис. 6 Вольт-амперна характеристика фотоелементів.

Максимальну потужність отримують в тому випадку, коли сонячний елемент знаходиться в режимі, зазначеному точкою а на рис. 6.

Основною експлуатаційною характеристикою ФЕП є коефіцієнт корисної дії. ККД сонячного модуля завжди нижче, ніж ККД його складових сонячних елементів. Це викликано втратами, які виникають внаслідок не ідентичності характеристик сонячних елементів, оскільки характеристика кожного елемента індивідуальна. Тому в разі послідовного з'єднання сонячних елементів, точки максимальної потужності у них не співпадають.

Коефіцієнт корисної дії сонячного модуля визначається як відношення корисної електричної потужності P_{MAX} на затискачах сонячного модуля до падаючої на поверхню сонячних елементів променевої потужності P_s :

$$\eta = (P_{MAX} / P_s) \cdot 100\%,$$

де P_{MAX} - максимальна електрична потужність знаходиться за допомогою кривої потужності чи ВАХ;

P_s – падаюча променева енергія дорівнює:

$$P_s = E \cdot S, \text{ Вт},$$

де $S = 0,0625 \text{ м}^2$ - сумарна площа поверхні сонячних елементів; $E [\text{Вт/м}^2]$ - інтенсивність падаючого світла – сумарна (пряма плюс розсіяна) сонячна радіація, яка вимірюється за допомогою спеціального приладу – піранометра.

Ефективність перетворення сонячної енергії в електричну залежить від електрофізичних характеристик, неоднорідності напівпровідникової структури, оптичних властивостей ФЕП та інтенсивності сонячної радіації.

Основні втрати енергії у ФЕП пов'язані з:

- відбиттям сонячного випромінювання від поверхні перетворювача;
- проходженням частини випромінювання через ФЕП без поглинання в ньому;
- відкиданням тіні від металевих контактів ФЕП;
- внутрішнім опором перетворювача і його контактів;
- невідповідністю енергії фотонів робочому енергетичному інтервалу ФЕП:

- не всі пари носіїв струму можуть бути рознесені полем. Деякі з них можуть рекомбінувати (гинуть) в результаті переходу збудженого електрона із зони провідності у валентну зону.
- кванти світла з енергією $h\nu < E_g$, не поглинаються напівпровідником і не беруть участі у фотоелектричному процесі.
- при $h\nu > E_g$ збуджені квантами світла електрони і дірки віддають надлишок енергії не на створення струму в зовнішньому колі, а на підвищення температури напівпровідника.

Якщо сонячна батарея працює в умовах туману, хмарності або ж знаходиться низько над горизонтом, то вона виробляє лише частку своєї продуктивності (див. табл. 2). При невеликій хмарності вона може видавати до 80% максимальної потужності, а в похмуру погоду - до 30% (рис. 7). При певній освітленості

модуль припиняє виробництво електричної енергії: для кристалічних модулів - $150\text{--}200 \text{ Вт/м}^2$, а для аморфних - близько 100 Вт/м^2 .

Таблиця 2

Вплив різних світлових умов на виробництво електричної енергії сонячними панелями (у % від повної потужності)

Світлові умови	у % від повної потужності
Яскраве сонце, панелі розташовані перпендикулярно сонячним променям	100
Легка хмарність	60-80
Похмура погода	20-30
За шибкою, один шар, скло і панель перпендикулярні сонячним променям	91
За шибкою, два шари, скло і панель перпендикулярні сонячним променям	84
За шибкою, один шар, скло і панель під кутом 45° сонячним променям	64
Штучне світло в офісі, на поверхні письмового столу	0,4
Штучне світло всередині яскравого приміщення	1,3
Штучне світло всередині житлового приміщення	0,2

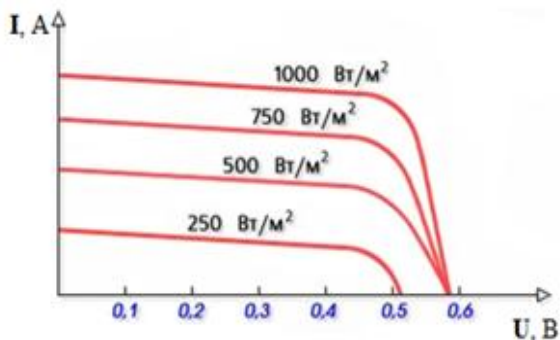


Рис. 7 Залежність ефективності ФЕП від інтенсивності сонячного випромінювання.

Положення Сонця на небосхилі визначається двома координатами - схиленням і азимутом (рис. 8). Схилення - це кут між лінією, що з'єднує спостерігача і Сонце, і горизонтальною поверхнею. Азимут - це кут між напрямом на Сонце і напрямом на південь.

На практиці сонячні панелі повинні бути орієнтовані під певним кутом до горизонтальної поверхні. Невеликі відхилення від цієї орієнтації не відіграють істотної ролі, тому що протягом дня Сонце рухається по небу зі Сходу на Захід. Наприклад, частка виробленої енергії фотоелектричною системою при куті нахилу ФЕМ у 45° для широти місцевості 52° північної широти складає: на захід - 78%; на південний захід - 94%; на південь - 97%; на південний схід - 94%; на схід - 78%.

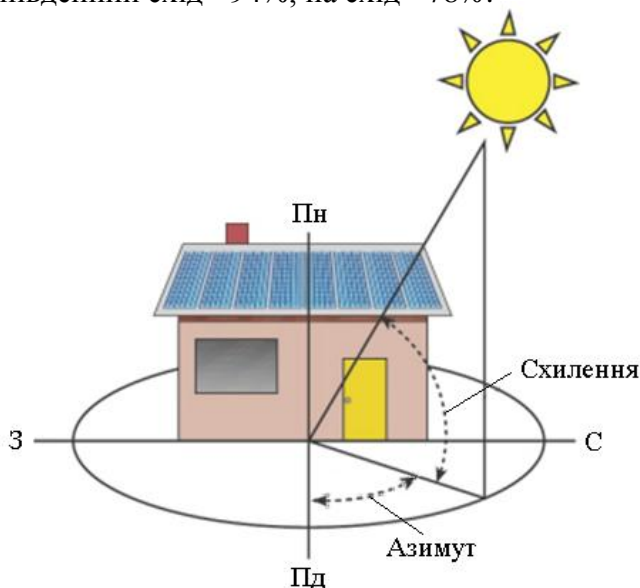


Рис. 8 Координати, що визначають положення Сонця на небосхилі.

Сонячні панелі зазвичай розташовуються на даху або підтримуючій конструкції у фіксованому положенні і не можуть стежити за місцем положення Сонця протягом дня. Тому вони не розташовані під оптимальним кутом (90°) протягом усього дня. Кут між горизонтальною площиною і сонячною панеллю називають кутом нахилу.

Внаслідок руху Землі навколо Сонця мають місце також сезонні варіації кута нахилу. Взимку Сонце не досягає того ж кута, що і влітку. В ідеалі сонячні панелі повинні розташовуватися влітку більш горизонтально, ніж взимку. Тому кут нахилу для роботи влітку вибирається меншим, ніж для роботи взимку. Якщо немає можливості змінювати кут нахилу двічі на рік, то панелі повинні розташовуватися під оптимальним кутом, значення якого лежить десь посередині між оптимальними кутами для літа та зими. Для кожної широти є свій оптимальний кут нахилу панелей.

Для весни і осені оптимальний кут нахилу сонячних панелей приймається рівним значенню широти місцевості, для зими - до цього значення додається 10-15 градусів, а влітку - від цього значення віднімається 10-15 градусів. Невеликі відхилення до 5 градусів від цього оптимуму майже не змінюють продуктивність панелей. Різниця в погодних умовах в більшій мірі впливає на вироблення електрики.

Підвищення робочої температури ФЕП істотно знижує ефективність виробництва електричної енергії (рис. 9) (напруга і

потужність панелі при підвищенні температури зменшуються, а струм підвищується).

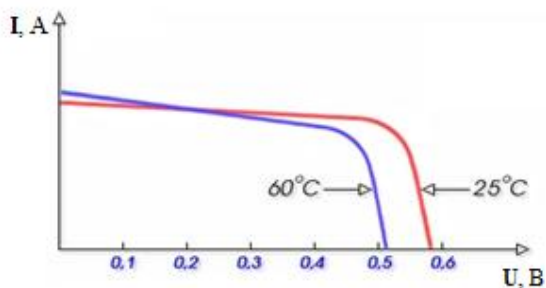


Рис. 9 ВАХ при різних температурах ФЕП.

Проблема більш повного використання енергії Сонця вирішується шляхом інтеграції фотоелектричних (ФЕ) панелей і сонячних колекторів (СК) в один технологічний пристрій – когенераційний фотоелектричний тепловий модуль - ФЕТМ (англ., «Photovoltaic thermal modules») (рис. 10). В них сонячна енергія за рахунок ФЕП перетворюється в електричну, а за рахунок теплового абсорбера – в теплоту.

ФЕТМ з тепловим абсорбером «лист-труба» один з найпоширеніших типів модулів і являє собою традиційний СК, на робочій поверхні якого розміщена фотоелектрична панель.

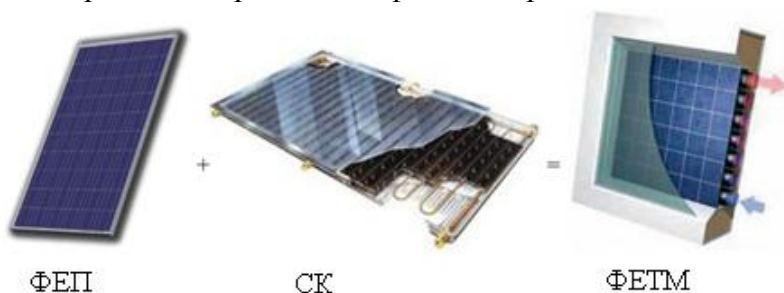


Рис. 10 ФЕТМ.

3 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На рис. 11 наведено схему експериментальної установки дослідження вольт-амперних характеристик ФЕП.

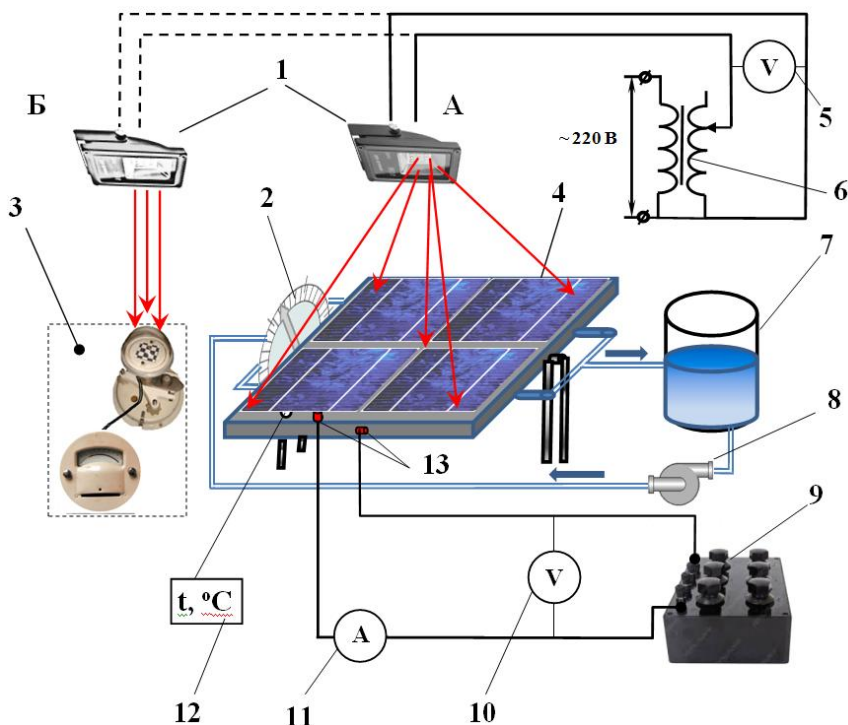


Рис. 11 Схема експериментальної установки:

1 – імітатор сонячного випромінювання; 2 – система зміни кута нахилу сонячного модуля; 3 – система вимірювання рівня падаючої сонячної енергії; 4 – сонячний модуль; 5,10 – вольтметри; 6 – ЛАТР; 7 – бак системи охолодження сонячного модуля; 8 – циркуляційний насос системи охолодження; 9 – магазин опорів РЗЗ; 11 – амперметр; 12 – датчик температури; 13 – клеми під'єднання навантаження до сонячного модуля.

До складу установки входять:

- штучне регульоване джерело світла (імітатор сонячного випромінювання);
- фотоелектричний модуль;
- система охолодження;
- регулятор кута нахилу модуля;
- піранометр типу М-80М;
- вимірювальні прилади.

Штучне регульоване джерело світла – прожектор з галогеновою лампою номінальною напругою 220 В і потужністю 500 Вт, який під'єднується до електричної мережі через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) для регулювання рівня освітленості модуля. При проведенні досліджень характеристик сонячного модуля, імітатор може займати два положення:

А – робочий режим імітації надходження сонячної енергії на поверхню сонячного модуля;

Б – режим вимірювання інтенсивності падаючої світлової енергії.

Рівень освітленості вимірюється за допомогою піранометра типу М-80М з гальванометром типу ГСА-1.

Сонячний модуль складається з чотирьох квадратних 125х125 мм елементів з полікристалічного кремнію, які розташовані на алюмінієвій основі з водяним охолодженням. Установка має можливість змінювати кут нахилу ФЕМ. Номінальна напруга ФЕП - 0,5 В, напруга холостого ходу - 0,62 В, ККД - 15%.

Водяна система охолодження ФЕП з абсорбером типу «лист-труба» наведена на рис. 12. Абсорбер – алюмінієва пластина з двома паралельними трубами, які проходять посередині ФЕП.

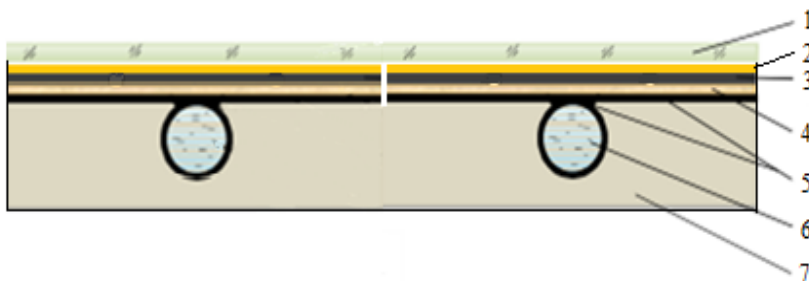


Рис. 12 Будова системи охолодження ФЕП з абсорбером типу «лист-труба»:

1 – світлопрозоре покриття; 2 – з'єднующий матеріал; 3 – фотоелектрична панель; 4 – теплопровідна електроізоляційна з'єднующа речовина; 5 – тепловий абсорбер типу «лист-труба»; 6 – теплоносій (вода); 7 – теплоізоляційний матеріал.

При дослідженні роботи сонячного модуля складається електрична схема з амперметра і вольтметра, а в якості електричного навантаження використовують регульований опір (магазин опорів).

4 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. До виконання лабораторної роботи на установці допускаються лише студенти, що ознайомились з методичними вказівками та правилами безпеки, підготували протокол до лабораторної роботи.

2. Без дозволу викладача не можна допускати коротке замикання або змінювати полярність контактів.

3. Дослідження проводяться лише під керівництвом викладача або учбового майстра.

4. У разі виникнення будь-яких несправностей необхідно терміново повідомити про це викладача.

5 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

В безхмарні сонячні дні як джерело світла можна використовувати Сонце, однак необхідно враховувати постійну зміну його положення і відповідну зміну кута падіння сонячних променів, тому для підтримання постійної величини падаючої променевої енергії під час проведення тривалих вимірювань необхідно періодично коректувати орієнтацію сонячного модуля відносно Сонця. Вплив нерівномірності у часі падаючої променевої енергії від зміни кута нахилу чи тимчасового затінення може призвести до суттєвих похибок результатів дослідів.

Для дослідження роботи сонячного модуля використовується стабільне і потужне джерело світла.

5.1 Визначення інтенсивності надходження світлової енергії від штучного джерела світла

За допомогою піранометра і гальванометра (рис. 13) вимірюють інтенсивність надходження світлової енергії E [Вт/м²] від напруги, яка подається на штучне джерело світла. Піранометр встановлюють в положення Б (див. рис. 11) таким чином, щоб його вимірювальна поверхня (термобатарея) була орієнтована відносно джерела світла аналогічно сонячному модулю (перпендикулярно променям світла та на такій самій відстані від джерела світла).

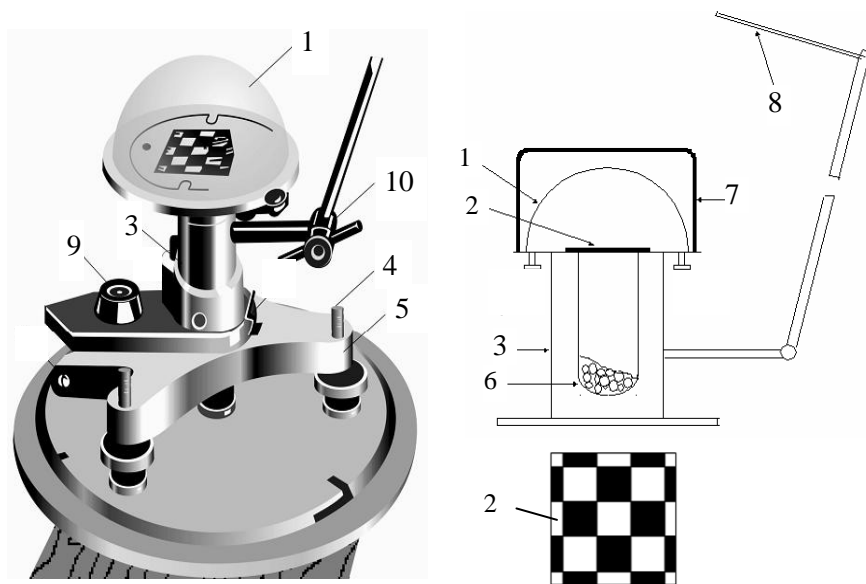


Рис. 13 Піранометр універсальний термоелектричний М-80М:
1 – піранометрична головка; 2 – термоелектрична батарея; 3 – стійка;
4 – встановлювальний гвинт; 5 – підставка; 6 – осушувач; 7 – металева кришка; 8 – затінювач; 9 – датчик рівня; 10 – шарнірне кріплення затінювача.

До штучного джерела світла за допомогою ЛАТРу 6 (рис.11) підводиться задане значення напруги, яке фіксує вольтметр 5.

З метою врахування нерівномірності освітлення провести вимірювання піранометром в кількох обраних базисних точках (n_1, n_2, n_3, n_4, n_5) та отриманні результати усереднити - $n_{\text{ср}}$. Отримане середнє значення $n_{\text{ср}}$ в поділках гальванометра помножити на перевідний множник $14,2 \text{ Вт/м}^2$ і отримати величину інтенсивності падаючого світла.

За допомогою ЛАТРу змінити напругу, яка подається на штучне джерело світла і провести аналогічні вимірювання. За отриманими даними побудувати графік залежності інтенсивності падаючого світла від напруги, яка подається на штучне джерело світла $E = f(U_{\text{ЛАТР}})$. Отриманий графік використовується при проведенні досліджень за пунктами 5.2-5.5.

5.2 Вплив зміни рівня освітленості на характеристики сонячного модуля

1. Для проведення досліджень збирається схема експериментальної установки з вимірювальними приладами рис. 10. В якості електричного навантаження використовується магазин опорів, на якому попередньо встановлюється великий опір порядку 1000 Ом .

2. Встановити сонячний модуль перпендикулярно до променів джерела світла.

3. За допомогою ЛАТРу встановлюється мінімальна напруга

на прожекторі з діапазону, вказаного викладачем.

Для виключення впливу температурних коливань поверхні елементів необхідно дочекатися виходу сонячного модуля в стаціонарний тепловий режим (тобто зростання температури елементів повинно припинитися, мінімум 2-3 хв.). Температура вимірюється термоперетворювачем опору «ТЭРА-ТСМ-2-8-100М-В-3-2000-МЭ-(-50...180)», закріпленим під поверхнею сонячного модуля. Отримані значення опору **R** за допомогою градуювального графіка (рис. 14) переводять в значення температури $t_{\text{пов}}$, які заносять в табл. 3.

Після вмикання прожектора необхідно дочекатись стабільного температурного режиму на сонячному модулі (5-10 хв.). Значення інтенсивності падаючого світла E [Вт/м²] від штучного джерела світла береться з графіку побудованому у п. 5.1.

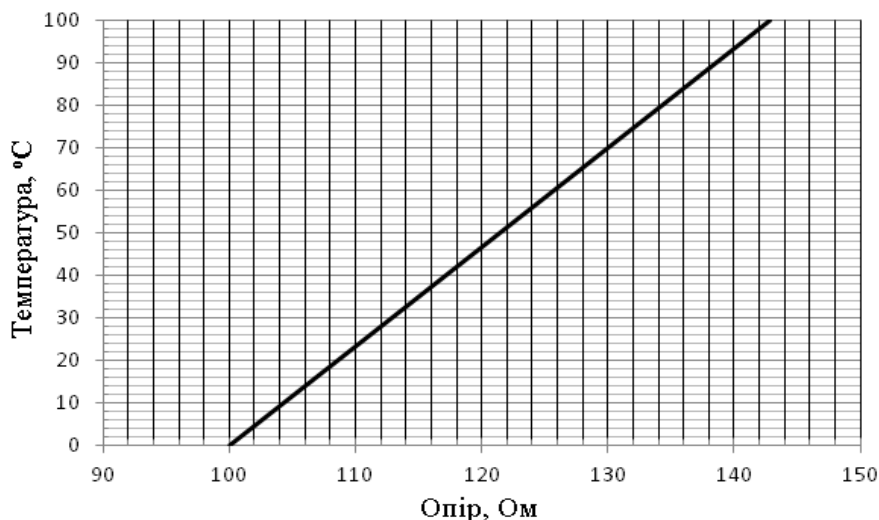


Рис. 14 Градувальний графік термоперетворювача опору «ТЭРА-ТСМ-2-8-100М-В-3-2000-МЭ-/-50...180/».

Таблиця 3

$R = \text{_____} \text{ Ом}$ $t_{\text{пов}} = \text{_____} \text{ }^{\circ}\text{C}$		Кут нахилу променів до нормалі поверхні $\alpha = \text{_____} \text{ }^{\circ}$		
$P_s = E \cdot S = \text{_____} \text{ Вт}$		Інтенсивність падаючого світла Вт/м^2 : $E =$		
ККД модуля $\eta = \text{_____} \%$		Сумарна площа сонячних елементів, м^2 $S =$		
$R_{\text{МО}}, \text{ Ом}$	$R_{\Sigma}, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$P = U \cdot I, \text{ Вт}$
-	$\infty \text{ (XX)}$			
1000	1000			
100	100			
40	40,16			
20	20,16			
10	10,16			
5	5,16			
4	4,16			
3	3,16			
2,5	2,66			
2	2,16			
1,5	1,66			
1	1,16			
0,5	0,66			
0,2	0,36			
0,0	$R_A + R_{\text{МО}}^0 = 0,16$			

4. Вольт-амперна характеристика сонячного модуля знімається починаючи з режиму, близького до розімкненого кола (великий опір навантаження). Проводяться вимірювання напруги і струму за допомогою мультиметра DT830(832) для кожного значення опору і заносяться в таблицю 3. Після цього зменшується опір таким чи-

ном, щоб зміна напруги (струму) становила приблизно 0,1 В (0,1 А) до нуля, для даної установки рекомендовано такий ряд опорів R_{MO} : 1000; 100; 20; 10; 5; 4; 3; 2,5; 2; 1,5; 1; 0,5; 0,2; 0 Ом.

Після кожного перемикавання опору слід дочекатися встановлення стаціонарного режиму (15-20 с) і лише після цього заносити покази приладів у таблицю. Варто враховувати, що магазин опорів при всіх опорах, виставлених на 0, має деякий внутрішній опір, на суму якого з внутрішнім опором амперметра слід робити поправку при малих виставлених значеннях опору (0-5 Ом). Внутрішній опір магазину опорів прийняти рівним $R_{MO}^0 = 0,06$ Ом, мультиметра DT830(832) в режимі 10 А – $R_A = 0,1$ Ом.

Результати всіх вимірювань заносяться в таблицю 3.

5. Встановити за допомогою ЛАТРу нове (вище) значення напруги з діапазону, який заданий викладачем, дочекатись встановлення стабільного температурного режиму та зняти нову ВАХ (повторити п.п. 3-4).

6. Побудувати в одній системі координат $I = f(U)$ зняті вольт-амперні характеристики сонячного модуля (див. рис. 7) при різних рівнях освітленості, в системі координат $P = f(R)$ залежності потужності модуля від опору навантаження (шкалу опорів для наочності рекомендовано виконати у логарифмічному масштабі), а також у системі координат $P = f(U)$ криві потужності модуля.

7. За отриманими графіками зробити висновки про форму ВАХ.

8. За графіками $P = f(R)$ зробити висновок про діапазон опо-

рів навантаження, у якому сонячний модуль віддає максимальну потужність, а отже має найбільшу ефективність.

9. Для кожного рівня освітленості визначити максимальну потужність модуля P_{MAX} за даних умов та напругу при цьому U_{mp} . Точка максимуму потужності (точка **a** рис. 6) визначається як максимум кривої потужності. Це має місце при найбільшому значенні добутку напруги U_{mp} і струму I_{mp} . На кривій ВАХ знайти струм I_{mp} , що відповідає максимальній вихідній потужності сонячного модуля за даних умов.

10. Побудувати залежність максимальної потужності модуля від рівня освітленості $P_{MAX} = f(E)$, зробити висновки про характер залежності.

5.3 Вплив кута нахилу сонячного модуля відносно джерела світла на його характеристики

1. Встановити сонячний модуль перпендикулярно до променів джерела світла та фіксований рівень освітленості, дочекатися встановлення стаціонарної температури, виміряти її. Провести аналогічні п. 5.2 вимірювання, побудувати аналогічні характеристики. Після цього змінити кут нахилу сонячного модуля, зафіксувати нове положення та провести вимірювання. Побудувати ВАХ при різних кутах нахилу променів до нормалі поверхні з кроком $15 - 20^\circ$ від 0° до 90° . Останню серію вимірювань провести за умови виключення прямого освітлення елементів джерелом

світла, тобто при умовах розсіяного освітлення (для цього випадку можна прийняти кут нахилу $\alpha = 90^0$). Результати вимірів кожного дослідів заносять в таблицю 4, яка аналогічна таблиці 3.

2. Оцінити максимальну потужність модуля та значення опору навантаження при цьому для кожного значення кута нахилу, побудувати графічні залежності $P_{\text{MAX}} = f(\alpha)$, $R(P_{\text{MAX}}) = f(\alpha)$. Зробити висновки про величину зниження потужності модуля при зміні кута нахилу модуля відносно джерела світла та про величину зміни опору навантаження при цьому. Оцінити ефективність роботи сонячного модуля в умовах розсіяного освітлення.

5.4 Вплив забруднення робочої поверхні сонячного модуля на його характеристики

1. Встановити сонячний модуль перпендикулярно до променів джерела світла з заданим рівнем освітлення. Зверху на поверхню модуля покласти покриття, що імітує забруднення робочої поверхні. Дочекатися встановлення стаціонарної температури і виміряти її. Провести аналогічні п. 5.2 вимірювання, побудувати ВАХ і криву потужності. Для оцінки впливу забруднення необхідно провести серію вимірювань також з чистою поверхнею сонячного модуля при тих самих умовах, і побудувати отримані характеристики для двох випадків в єдиній системі координат. Результати вимірів кожного дослідів заносять в таблицю 5, яка аналогічна таблиці 3.

2. Знайти точку максимальної потужності, оцінити ступінь зниження максимальної потужності модуля при його забрудненні (та незмінних інших умовах). Зробити висновки про доцільність періодичного очищення робочої поверхні сонячного модуля.

5.5 Вплив температури робочої поверхні сонячних елементів на його характеристики

1. Сонячний модуль розташовують перпендикулярно до променів джерела світла з номінальною напругою живлення. Вимірюють температуру ФЕП в стаціонарному режимі при відсутності охолодження. Перша серія вимірювань проводиться аналогічно п. 5.2. Після цього у контур охолодження подається вода з мінімальною витратою, і в стаціонарному режимі фіксується нова температура елементів та проводиться нова серія вимірювань. Збільшуючи витрату води, досягають чергового зниження температури елементів, таким чином знімаються ще декілька характеристик. Результати вимірів кожного дослідів заносять в таблицю 6, яка аналогічна таблиці 3.

2. Побудувати ВАХ і криві потужності модуля при різних температурах. Визначити точки максимальної потужності для кожного значення температури, побудувати графік залежності $P_{\text{MAX}} = f(t)$. Зробити висновки про величину зниження потужності модуля при збільшенні температури елементів і про доцільність охолодження сонячних модулів.

Звіт з лабораторної роботи включає:

- теоретичні відомості;
- заповнені таблиці 3-6;
- побудовані графіки у відповідності до завдань у підпунктах 5.1-5.5;
- висновки.

Контрольні запитання

1. Назвати причини необхідності використання нових джерел енергії.
2. Які напівпровідникові матеріали використовуються в ФЕП?
3. На якому принципі заснована робота ФЕП?
4. Назвати основні типи ФЕП та їх особливості.
5. Який тип фотоелементів менш схильний до дії високих температур?
6. Чому дорівнює ККД фотоелементу?
7. Що називають "вольт-амперною характеристикою" ФЕП?
8. Які фотоелементи використовуються в експериментальній установці і які їх характеристики?
9. Яким є типовий ККД ФЕП та які основні причини втрат енергії в ФЕП?
10. Що входить до складу сонячного модуля?
11. Що використовується в якості штучного джерела світла?

12. Яка основна мета дослідження вольт-амперної характеристики і кривої потужності сонячного модуля?
13. Від яких факторів залежить ефективність роботи сонячного модуля?
14. Як, використовуючи лише графік ВАХ сонячного модуля, знайти оптимальну робочу точку?
15. Чому ККД сонячного модуля нижчий, аніж ККД його складових сонячних елементів?
16. Чим вимірюється освітленість ФЕП?

Література

1. Стребков Д.С., Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. – 264 с.
2. X-SERIES SOLAR PANELS. SunPower. URL: <http://us.sunpower.com/homes/productsservices/solar-panels/x-series/>.
3. <http://www.technopark.by/iccee/resources/280.html>.
4. Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалеева Р. Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. – 90 с.